УДК 621.375.826

Д. Г. Баканов, А. И. Одинцов,
А. И. Федосеев, В. Ф. Шарков

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАСЕЛЕННОСТЕЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ АЗОТА В НЕРАВНОВЕСНОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

В последнее время интенсивно разрабатываются методы измерения концентраций молекул и температуры газовых сред, основанные на использовании явления комбинационного рассеяния света [1—5]. Их известными достоинствами являются: отсутствие возмущения исследуемой среды, применимость как в случае равновесных, так и в случае термически неравновесных объектов, возможность исследования быстропротекающих процессов и проведения дистанционных измерений. В настоящей статье описывается экспериментальная установка для измерения колебательной температуры и плотности молекул азота

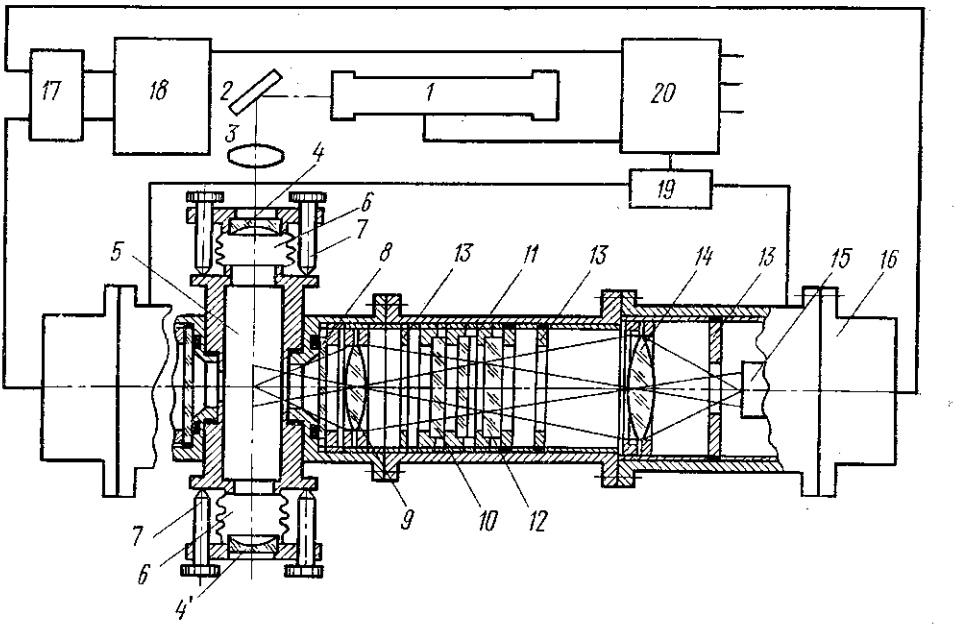

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации комбинационного рассеяния в газодинамическом потоке

в неравновесном газодинамическом потоке смеси CO_2—N_2—He при помощи спонтанного комбинационного рассеяния (СКР).

Измерения производились в одной из секций газодинамической системы с электродуговым подогревом рабочей смеси, описание которой дано в [6]. Общая схема экспериментальной установки изображена на

рис. 1. Система работала в импульсном режиме с временем истечения потока $\sim 10^{-2}$ с. Сечение прямоугольного канала потока (*5*) в исследуемой области равно $1{,}5 \times 10$ см^2. Возбуждение СКР производится 2-й гармоникой излучения серийного лазера ЛТИПЧ-8 (*1*) на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом с длиной волны $\lambda_л = 532$ нм. В измерениях используется режим однократных импульсов с максимальной энергией 5 мДж и длительностью 10^{-8} с. Юстировка оптической системы проводится в режиме периодических импульсов с частотой повторения до 100 Гц. Поляризация излучения лазера близка к линейной, направление колебаний электрического вектора волны перпендикулярно плоскости чертежа на рис. 1.

Для увеличения эффективности возбуждения СКР применяется многоходовая кювета [7]. Она состоит из двух сферических зеркал (*4* и *4'*) диаметром 25 мм с радиусом кривизны 25 см, расположенных на расстоянии 23,5 см друг от друга. Коэффициент отражения диэлектрических покрытий зеркал для длины волны лазера равен 99,5%. В покрытии входного зеркала на расстоянии 6 мм от центра имеется окно диаметром 1 мм, через которое луч лазера вводится внутрь кюветы. Оптическая ось кюветы расположена параллельно щели сопла на расстоянии 60 мм от критического сечения. Герметизация кюветы осуществляется сильфонами (*6*) и окнами (*8*). Юстировкой зеркал кюветы с помощью винтов (*7*) удается получить до 50 проходов лазерного луча (рис. 2). Полная ширина каустики лучей в центре кюветы составляет 8 мм. Перед входом в кювету помещается согласующаяся линза (*3*).

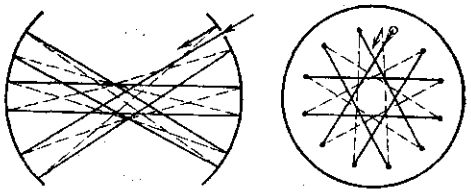

Рис. 2. Схема хода лучей в многоходовой кювете. Пунктиром обозначены лучи, распространяющиеся к входному зеркалу

Комбинационное рассеяние в стоксовой и антистоксовой компонентах регистрируется в боковом направлении по двум каналам, которые полностью идентичны за исключением характеристик светофильтров. Рассеянное излучение с помощью системы двух линз (*9*) и (*14*) с фокусными расстояниями $f_1 = 4$ см и $f_2 = 5$ см направляется на фотокатод ФЭУ (*15*). Между линзами помещаются диафрагмы (*13*), узкополосные контрастные интерференционные светофильтры (*12*) и цветные стекла (*11*), которые обеспечивают выделение стоксовой ($\lambda_c = 607{,}3$ нм) и антистоксовой ($\lambda_a = 473{,}2$ нм) компонент в соответствующих каналах. В канале стоксовой компоненты использована комбинация цветных стекол ОС-14 и СЗС-25, в канале антистоксовой компоненты — стекла ЖС-12 и СЗС-22. Для предотвращения проникновения рассеянного возбуждающего излучения лазера (рэлеевское рассеяние и рассеяние на зеркалах кюветы) в каналы введены отражательные интерференционные светофильтры (*10*), «блокирующие» излучение с длиной волны 532 нм. Пропускание каналов на рабочих длинах волн составляет 25 и 31% соответственно для стоксовой и антистоксовой компонент при ширине полосы выделения спектра в обоих каналах около 3 нм. Степень подавления возбуждающего излучения в каждом канале не менее 10^{10}. Полезный световой диаметр оптических элементов системы равен 35 мм.

Входная апертура обеспечивает сбор рассеянного излучения с площадки $\sim 8\times8$ мм^2 в пределах телесного угла $\Delta\Omega=0{,}4$ ср. Протяженность рассеивающего объема вдоль оптической оси (~ 8 мм) определяется шириной каустики пучков в многоходовой кювете.

Для регистрации сигналов СКР используются фотоумножители типа ФЭУ-84 с модуляцией чувствительности. В нерабочем состоянии на модулирующий электрод ФЭУ подано запирающее напряжение —20 В относительно катода, благодаря чему чувствительность ФЭУ понижается более чем на 3 порядка. Отпирающий импульс с амплитудой +70 В и длительностью 100 мкс, вырабатываемый мультивибратором (*19*), производит включение ФЭУ за 10 мкс до импульса сигнала СКР.

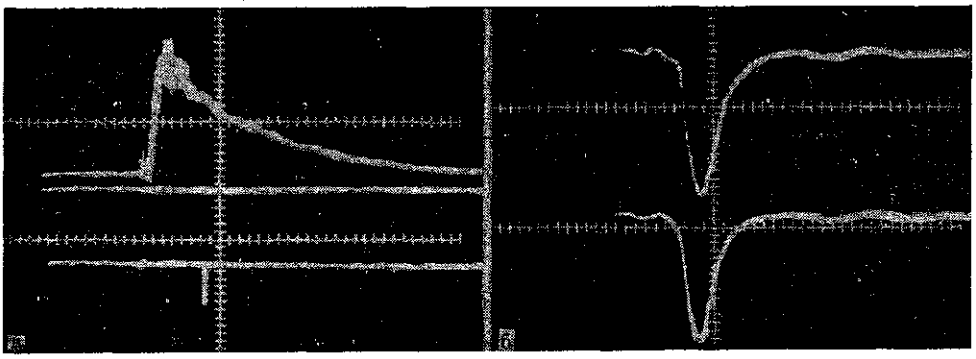

Рис. 3. Осциллограмма давления газа в форкамере (вверху) и импульс синхронизатора, совпадающий по времени с моментом включения возбуждающего лазера (внизу). Горизонтальный масштаб — 2,5 мс/деление (*а*). Осциллограммы импульсов СКР (*б*). Вверху — стоксова компонента, вертикальный масштаб 1 В/деление. Внизу — антистоксова компонента (0,25 В/деление). Горизонтальный масштаб — 1 мкс/деление

Применена схема компенсации паразитного сигнала, возникающего на фронте отпирающего импульса. Компенсация производится импульсом регулируемой амплитуды (15—20 В), который вырабатывается тем же мультивибратором, и подается на 10-й динод ФЭУ. Модуляция чувствительности позволила устранить влияние засветки ФЭУ излучением импульсного электродугового разряда, производящего нагрев смеси в форкамере в начале рабочего цикла установки (длительность разряда составляет 0,1 мс).

В общем с ФЭУ металлическом кожухе располагается предусилитель (*16*) с входным сопротивлением $R=1$ кОм, сигнал с которого подается на усилитель-преобразователь (*17*), обеспечивающий на выходе сигнал постоянной формы с амплитудой, пропорциональной входному сигналу. Общий коэффициент усиления может изменяться от $K=10$ до $K=500$. Регистрация сигналов обеих компонент СКР производится на двухлучевом осциллографе С8-2. Блок синхронизации (*20*), собранный на основе типовых схем мультивибраторов, позволяет плавно регулировать задержку между моментами включения импульсной газодинамической установки, отпирания ФЭУ и срабатывания лазера, а также осуществляет синхронный запуск разверток осциллографов (*18*). На осциллограммах, приведенных на рис. 3, задержка лазерного

импульса относительно момента включения электродугового разряда составляет 3 мс.

Проведенный анализ показывает, что в нашей установке величина среднеквадратичной флуктуации напряжения сигнала на выходе ФЭУ $\overline{\Delta u^2} = \overline{(u-\bar{u})^2}$ в серии измерений определяется статистикой вылета фотоэлектронов с катода ФЭУ и (в меньшей степени) флуктуациями числа рассеянных фотонов, в то время как влиянием шумов ФЭУ можно пренебречь. При этом отношение сигнал/шум определяется как $S = \frac{\bar{u}}{\sqrt{\Delta \bar{u}^2}} = \sqrt{\eta_{кв} \bar{n}_ф}$, где $\eta_{кв}$ — квантовый выход фотокатода, $\bar{n}_ф$ — среднее число рассеянных фотонов, попадающих на фотокатод за один импульс. Минимальная регистрируемая концентрация молекул, соответствующая заданному S, равна

$$N_{min} = \frac{S^2 h \nu_л}{E_л \eta_{кв} \sigma l_{эфф} \Delta \Omega \tau}, \qquad (1)$$

где $E_л$ — энергия лазерного импульса с частотой $\nu_л$, σ — сечение СКР на единицу телесного угла, $\Delta\Omega$ — телесный угол, в пределах которого регистрируется рассеянный свет, $l_{эфф}$ — эффективная длина пути луча в исследуемом объеме (с учетом многократных проходов в кювете), τ — коэффициент пропускания оптической системы.

Принимая значение $\sigma = 3{,}7 \cdot 10^{-31}$ см^2 ср$^{-1}$, что соответствует Q-ветви стоксовой компоненты N_2 для $\lambda_л = 532$ нм [8], $E_л = 5 \cdot 10^{-3}$ Дж, $\eta_{кв} = 0{,}07$, $\Delta\Omega = 0{,}4$ ср, $\tau = 0{,}25$, $l_{эфф} = 20$ см, для $S = 10$ найдем $N_{min} = 1{,}5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, что соответствует приведенному давлению 600 Па.

С помощью описанной установки были выполнены измерения концентрации, а также колебательной температуры молекул азота в неравновесном газодинамическом потоке. Режим работы газодинамической системы характеризовался следующими параметрами [6]: относительное содержание компонент $CO_2 : N_2 : He = 1 : 2{,}5 : 2$; давление напуска $P_н = 3{,}5 \cdot 10^5$ Па; энергия электродугового разряда $E = 5$ кДж; максимальное давление в форкамере $P_0 = 13 \cdot 10^5$ Па.

Измерение концентрации азота в газодинамическом потоке производилось по интенсивности сигнала стоксовой компоненты СКР. Возбуждение колебательных уровней азота при этом не учитывалось. Предварительная калибровка измерительного канала осуществлялась по измерению сигнала СКР в неподвижном воздухе в интервале давлений от $2 \cdot 10^3$ до 10^5 Па. Значение концентрации молекул азота, измеренное в этом режиме работы, оказалось равным $(5 \pm 1) \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Значение концентрации частиц в сочетании с измеренной пьезодатчиком величиной статического давления в потоке $P = 5000$ Па позволяет рассчитать (с учетом состава смеси) температуру газа в потоке $T_{газ} = 280$ К. Полученные значения плотности частиц и газовой температуры находятся в качественном согласии с результатами теоретических оценок. Заметим, что величина концентрации молекул позволяет по известному расходу газа определять скорость потока.

Определение колебательной температуры азота производилось путем измерения отношения интенсивностей стоксовой I_c и антистоксовой I_a компонент с расчетом по формуле

$$T_{\text{кол}} = \frac{c\,h\,\nu_{\text{кол}}}{k}\left[\ln\frac{I_c}{I_a} + 4\ln\frac{\lambda_c}{\lambda_a}\right]^{-1}, \qquad (2)$$

где $\nu_{\text{кол}} = 2330{,}7$ см$^{-1}$ — колебательная частота N_2, k — постоянная Больцмана, c — скорость света. Влияние ангармонизма молекул N_2 не учитывалось. Калибровка относительной чувствительности каналов производилась в диапазоне температур 1000—1300 К путем измерения температуры термически нагретого азота при атмосферном давлении. С этой целью азот нагревался в электрической печи и продувался через многоходовую кювету. Температура нагревательной печи определялась оптическим пирометром с точностью ±50 К.

На рис. 3, *б* приведена типичная осциллограмма сигналов компонент СКР в газодинамическом потоке. Значения колебательной температуры, рассчитанные по формуле (2) для разных опытов, лежат в пределах 850—1000 К. Указанный разброс определяется как ошибкой метода, так и имеющейся нестабильностью работы газодинамической системы. Таким образом, результаты экспериментов показывают, что данная установка с успехом может использоваться для диагностики разреженных неравновесных газодинамических потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bailly R., Pealat M., Taran J. P. E. „Optics Communications“, 1976, **17**, N 1, 68.
2. Barrett J. J., „J. Opt. Soc. Am.“, 1976, **66**, N 8, 801.
3. Lapp M., Hartley D. L. „Com. Sci. a. Tech.“, 1976, **13**, 199.
4. Костко О. К. «Квантовая электроника», 1975, **2**, 2133.
5. Подобедов В. Б., Пындык А. М., Стерин Х. Е. «Оптика и спектроскопия», 1973, **34**, 825.
6. Одинцов А. И., Федосеев А. И., Баканов Д. Г. «Письма в ЖТФ», 1976, **2**, 145.
7. Herriott D., Kogelnic H. „Appl. Opt.“, 1964, **3**, N 4, 532.
8. Hyatt H. A., Cherlow J. M., Fenner W. R., Porto S. P. S. „J. Opt. Soc. Am.“, 1973, **63**, 1604.

Кафедра
оптики и спектроскопии

Поступила в редакцию
24.02.78